北京昌平农业景观传粉服务供给和需求评估研究

宋潇(1);伍盘龙(1);王飞(2);李想(1);孙仁华(2);张旭珠(1);夏博辉(1);刘云慧(1,3)

(1)中国农业大学资源与环境学院　北京　100193; (2). 农业部农业生态和资源保护总站　北京　100125; (3). 中国农业大学生物多样性与有机农业北京市重点实验室　北京　100193

摘　要: 近年来全球范围内蜜蜂多样性的下降引起了各国科学家与政府对与农业可持续生产密切相关的传粉服务的关注。为了认识和了解区域传粉服务的供给和需求状况, 为制定区域传粉管理策略奠定基础, 本研究在 2016 年对北京昌平 7 种常见生境的野生蜂多样性、植被组成、土壤紧实度、作物种植面积等数据进行了调查, 根据野生蜂的物种组成、飞行距离、筑巢偏好和活动季节, 生境的植物资源数据和筑巢适宜性数据, 结合 InVEST 模型对研究区传粉服务的供给进行了评估; 根据研究区传粉依赖作物种植面积和各种作物对传粉服务的依赖程度, 对研究区传粉服务的需求进行了评估; 通过叠加传粉服务供给和需求分级图, 评估了研究区的传粉服务供需匹配状况。结果显示, 自然林是最适宜野生蜂的生境, 其次是人工林、荒草地和边界生境; 果园既是野生蜂的生境, 也对传粉服务有较高的需求; 大棚几乎不供给传粉服务, 但对传粉服务有较高需求。对传粉供需等级匹配的结果显示, 昌平区供给等级高于需求等级的区域占 34.17%, 大部分分布于山区, 有较高的传粉服务供给和较低的传粉服务需求, 具有较高保护价值; 供给等级低于需求等级的区域占 27.76%, 多分布于靠近山区的平原地区, 虽然具有较高的传粉服务供给, 但也具有最高的需求等级; 供给等级与需求等级持平的区域占 47.27%, 远离山区的平原地区由于具有较多半自然生境, 传粉服务的供需基本是匹配的。最后, 文章对研究区传粉服务提升提出了管理建议: 对于高供给-中/低需求(重点保护区)的区域, 建议发展低管理强度的有机农业, 保护区域内的生境; 对于中/低供给-高需求的区域(重点提升区、一般提升区), 建议使用养殖蜜蜂提升传粉服务, 同时在景观尺度上增加自然/半自然生境比例, 建立生态廊道以增加生境之间的连通度; 对于供需等级较为一致的区域(重点维持区、一般维持区), 建议降低农业区域的管理强度, 同时增加生境间的连接度, 以实现传粉服务的可持续供给。

关键词: 农业景观; 野生蜂多样性; 生态系统服务; 传粉供给; 传粉需求

中图分类号: S4; S8

Evaluation of pollination service supply and demand of agricultural landscape in Changping District, Beijing*

SONG Xiao[1], WU Panlong[1], WANG Fei[2], LI Xiang[1], SUN Renhua[2], ZHANG Xuzhu[1], XIA Bohui[1], LIU Yunhui[1,3**]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China; 3. Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The diversity of bees has declined in recent years around the world. This has raised concerns about pollination service, which is closely linked with sustainable agricultural production. To understand the supply and demand of regional pollination service and laid the basis for developing a regional pollination management strategy, we investigated seven common habitat types, which were forest, woodland, grassland, orchard, greenhouse, road boundary, field margin, and one non-habitat land in Changping District of Beijing in 2016. The data including bee (species, flying distance, nesting preference and active season), vegetation (vegetation composition, flowering season, nectar/pollen resources), nesting suitability (soil compaction) and crop area were collected. The supply of pollination service in the study area was evaluated by using the InVEST model, which was based on species composition, flight distance, nesting preference and activity season of wild bees. The model also used data of plant resources and nesting suitability in the habitat to estimate the dependent degree of crops on pollination. The demand for pollination service was evaluated based on planting area and dependence on pollination service of crops. Furthermore, the match between pollination service supply and demand was studies by stacking the levels of supply and demand. The results showed that natural forests were the most suitable habitat for wild bee production, followed by woodlands, grasslands and border habitats. Orchards too were wild bee habitats and also had high demand for pollination service. Greenhouse barely provided pollination service, but had a high demand for it. The supply and demand match results showed that in Changping area, pollination service supply exceeded demand. The areas where supply level was higher than demand level accounted for 34.17%, mostly distributed in mountain areas. The areas with the highest supply and lower demand for pollination service was worthy for

protection. The areas with lower supply than demand accounted for 27.76% and were distributed in plain regions near mountains. Although such areas had a relatively high supply, demand was the highest. Areas with the same supply-demand accounted for 47.27%, distributed in plain areas far from mountains. In these areas, the supply and demand for pollination service were basically in balanced match because of the high proportion of semi-natural habitats. Finally, some management strategies were suggested to improve pollination service in the study area. For the areas with higher supply and medium/lower demand (key protected region), it was suggested to develop organic agricultural with less management to protect habitat. For medium/lower supply and higher demand areas (key improved and generally improved regions), it was necessary to improve pollination service by breeding bee and increase natural/semi-natural habitat, and strengthen connectivity among habitats through ecological corridor construction. For the area with balanced supply and demand, (key maintained, and generally maintained regions), decreasing management intensity of agricultural area and increasing connectivity among habitats were important for keeping sustainable pollination service supply.

Keywords: Agricultural landscape; Wild bee biodiversity; Ecosystem service; Pollination service supply; Pollination demand

动物传粉是关系农业可持续发展和粮食安全的重要的生态系统服务之一[1-2], 全球约 1/3 的农作物生产依赖生物的传粉作用而实现[3]。自 1961 年以来, 全球依赖动物传粉的作物(主要是温带和热带的水果和坚果)的产量和种植面积大幅上升, 对传粉服务的需求也极大提高[4]。随着集约化农业生产带来的环境压力与全球人口增长带来的对粮食需求的增加, 提升传粉服务被认为是未来缓解集约化生产与粮食安全矛盾、通过可持续生产方式提升作物产量重要措施之一[5]。但是, 目前很多地区对于传粉服务的供给和需求状况尚缺乏深入的评估和认识, 本文以此为基础, 展开相关研究, 为传粉服务提升管理措施的制定提供指导和依据。

早期的传粉服务评估方法大多是基于经济价值的定量化评估, 但在生态系统服务管理的过程中, 仅计算服务的价值并不能带来更多的帮助。近年来, 以土地利用为基础, 并结合生态过程的生态系统服务制图方法受到了更加广泛的关注[6-8]。Kremen 等[9]提出的以土地利用数据为基础, 使用传粉者类群数据、不同土地利用类型的筑巢资源及植物资源数据等进行评估的传粉服务评估模型成为了后来许多传粉服务评估研究的基础模型。生态系统服务的评估通过供给和需求两方面进行[10-11]。在传粉服务的评估中, 供给是由传粉者类群特征(多度、物种丰富度、功能性等)而实现的; 服务的需求则是体现在人类对服务的“使用”上, “使用”的过程指的是传粉者类群多度/丰富度等对作物传粉的贡献[11-12]。但是, 当前大多数研究只关注传粉服务的供给, 较少从需求方面对传粉服务进行评估; 在对传粉服务的评估中使用的数据多来自于专家意见和文献, 而较少使用实际测得的数据。

膜翅目中的蜜蜂总科是自然界传粉昆虫中种类最多、数量最大的类群, 是最主要的授粉生物[13]。在农业集约化程度不断加强的今天, 传粉服务需求可能无法仅通过养殖蜜蜂得到满足[14], 因此, 研究者将目光转向了种类更多、分布更广、具有更高传粉效率的野生蜜蜂[15]。加强对野生蜂资源多样性的认识, 并对其所提供的传粉服务进行评估能够帮助更好地利用野生蜂资源, 对制定传粉服务保护和管理策略、保障农业可持续发展和人类粮食安全具有重要参考和借鉴价值。

针对国内在传粉服务的供给、需求方面的认识和研究的不足, 以及在评估过程中较少采用实测数据的情况, 本研究以北京市昌平区为例, 1)使用实际测得的生境适宜性数据和野生蜂功能群数据在 InVEST 模型中计算传粉服务的供给, 使用统计数据和作物对生物传粉的依赖程度计算研究区传粉服务的需求; 2)分析揭示了区域传粉服务的供需平衡状况; 3)此外, 基于区域传粉服务供需状况的评估, 探讨了区域传粉服务的管理和维持的策略。研究将为区域传粉服务供给、需求的评估及传粉服务的区域管理提供方法参考。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京市昌平区(40°2′~40°23′N, 115°50′~116°29′E), 面积 1 343.5 km^2。地势西北高、东南低, 山地海拔 800~1 000 m, 平原海拔 30~100 m。60%的面积是山区, 40%是平原。该区主要的农业生产类型为果树和蔬菜种植, 2015 年, 昌平区水果总产值为 53 347.4 万元, 占农业总产值的 68.9%, 蔬菜总产值为 21 592.0 万元, 占农业总产值的 27.9%。果树种植面积 7 000 hm^2。因此, 该区域对传粉服务的提升有着较大的潜在需求。

1.2 研究方法

在获取研究区土地利用图的基础上, 通过对典型生境中的野生蜂多样性进行扫网调查, 结合生境中植物资源可用性、筑巢适宜性及野生蜂的生境需求等指标, 使用 InVEST3.3.2 的 Pollination 模块进行传粉服务供给的评估; 通过研究区依赖传粉的作物的种植情况, 进行传粉服务需求的评估; 对比研究区传粉服务的供需分布状况, 对研究区提出传粉服务的管理建议。技术路线见图 1。

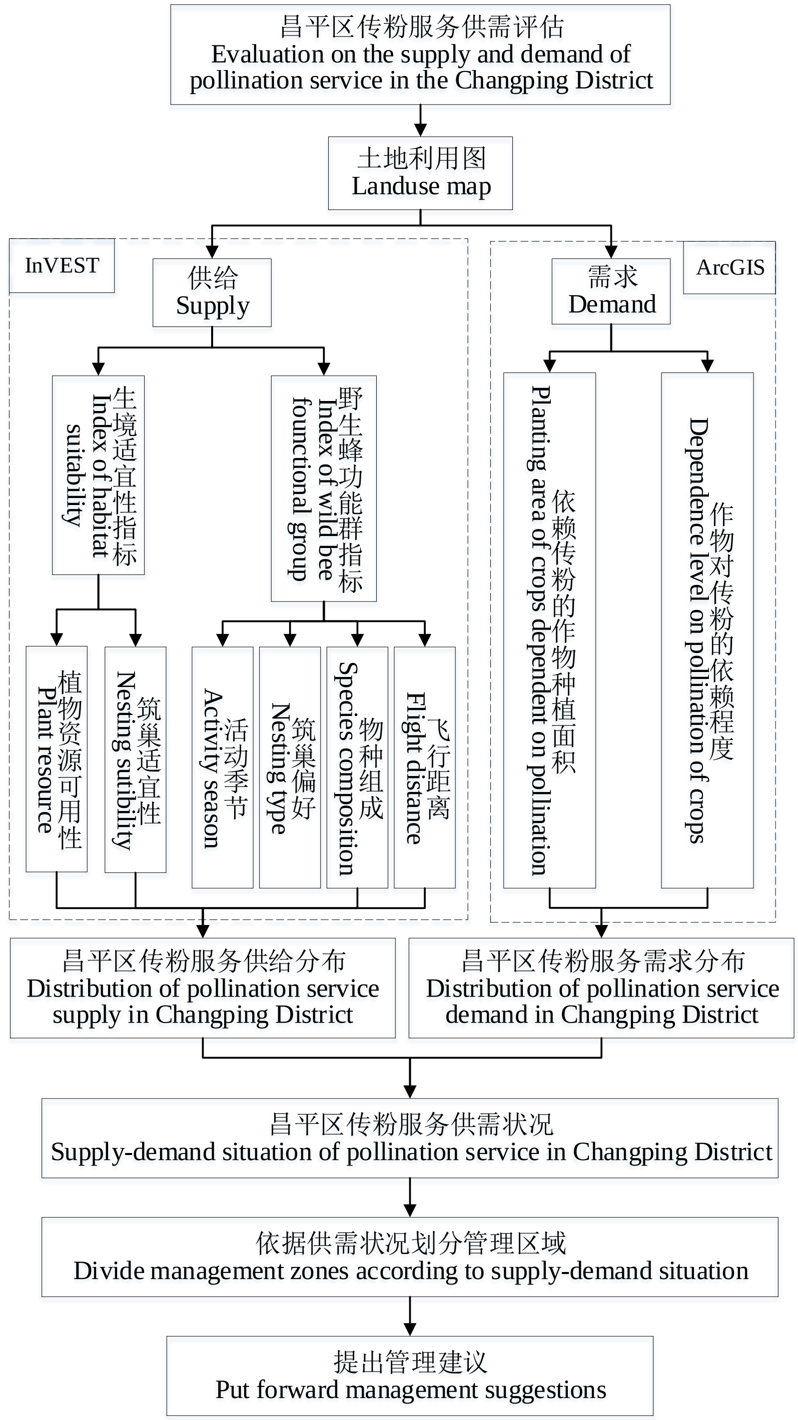


图 1　昌平区传粉服务供需评估技术路线图

Fig. 1　Technology roadmap of evaluating pollination service supply and demand in Changping District.

1.2.1　土地利用解译

采用 2015 年 8 月及 10 月研究区高分 2 号遥感影像, 进行特征提取、目视解译等多种方法综合的计算机解译(图 2), 将研究区的山区和平原区域分为自然林、人工林、荒草地、果园、大棚、道路边界、农田边界和非生境 8 种类型(图 3)。分类结果显示, 自然林、人工林、荒草地、果园、大棚、道路边界、农田边界和非生境

分别占研究区面积的 47.6%、11.8%、2.8%、7.18%、1.06%、0.18%、0.09%和 29.22%。以 2014 年在昌平区进行的实地景观调查结果为真实参考源, 使用混淆矩阵方法对分类结果进行精度检验。检验结果显示, 山区地区的分类总体精度为 76.9%, 平原地区的分类总体精度为 78.1%, 分类的准确性较高。

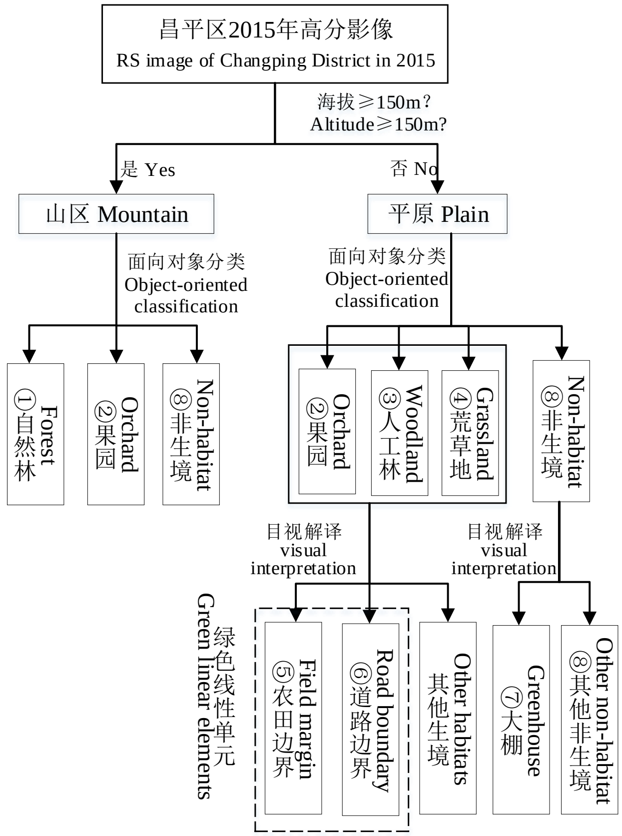


图 2　昌平区遥感(RS)影像分类方法

Fig. 2　Classification methods of remote sensing (RS) images of Changping District.

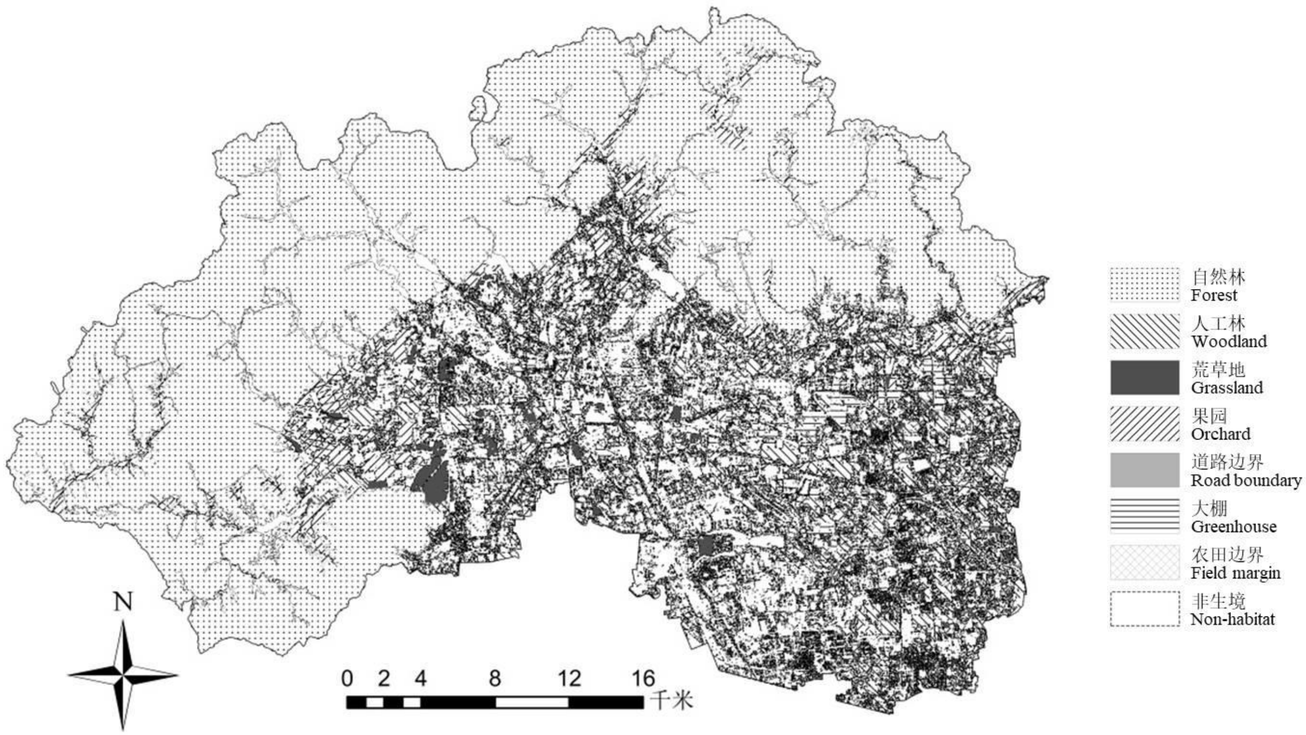


图 3　昌平区遥感影像分类结果

Fig. 3　Remote sensing image classification result of Changping District.

1.2.2　研究区传粉服务供给评估

本研究使用 InVEST3.3.2 中的 Pollination 模块进行传粉服务供给状况的分析。传粉服务的供给以野生蜂的相对多度指数表征, 需要输入的参数有: 划分为 10 m 栅格的土地利用数据; 各土地利用类型的筑巢适宜性、植物资源可用性; 各野生蜂物种的筑巢偏好、活动季节和飞行距离。使用以下公式来计算栅格 x 内的物种 β 的相对多度指数:

$$P_{x\beta} = N_j \frac{\sum_{m=1}^{M} F_{jm} \mathrm{e}^{\frac{-D_{mx}}{\alpha_\beta}}}{\sum_{m=1}^{M} \mathrm{e}^{\frac{-D_{xm}}{\alpha_\beta}}} \tag{1}$$

式中: $P_{x\beta}$指物种β在栅格 x 中的相对多度指数, N_j指生境类型 j 的筑巢适宜性, F_{jm}指生境类型 j 产生的植物资源的相对数量, D_{mx}指栅格 m 与栅格 x 之间的欧氏距离, α_β指物种 β 的飞行距离。

这里模型所计算出的结果是一个 0~1 之间的相对多度指数, 代表栅格内野生蜂多度的多寡, 而不是实际的多度值。

评估所需的参数通过以下方式获取:

1)野生蜂物种数据

通过野外调查的方式获取研究区野生蜂物种组成信息, 并据此查询和计算野生蜂筑巢偏好、活动季节、飞行距离等参数。

①野生蜂物种组成: 在 2016 年 4—9 月每个月的 24—29 日(4 月对果园的取样在果树盛花期进行), 使用扫网法[16]对自然林、人工林、荒草地、果园(包括苹果园、桃园和樱桃园)、大棚、农田边界和道路边界 7 种潜在生境进行野生蜂多样性调查, 每种生境选择 5 个样点, 共 45 个样点; 每个样点选择 3 条长 50 m, 宽 2 m 的样带(边界及大棚选择一条样带), 在天气晴朗温暖、风速较小的日子, 在每条样带内行走 10 min, 用网捕获见到的野生蜂, 保存到 75%酒精中, 带回实验室进行鉴定和分类。

②野生蜂飞行距离: 通过查阅《中国动物志》[17-18]及其他文献获得蜜蜂体长数据(通常取某蜜蜂物种的雌性的体长平均值作为该物种的体长数据), 并根据 Gathmann 等[19]的研究中的公式计算野生蜂的最大觅食距离(d):

$$d_i = -232.28 + 54.69 \times l_i \quad (2)$$

式中: l_i为蜜蜂物种 i 的体长。

③传粉者类群筑巢偏好和活动季节: 筑巢偏好根据《中国动物志》[17-18]及其他文献[20-22]确定。野生蜂类群的活动季节根据取样结果中不同物种的季节分布确定。

2)植物资源可用性数据

通过野外调查方式获取各生境植被组成的信息, 并据此计算研究区不同土地利用类型的植物资源可用性。

①植被状况调查: 在 2016 年 5 月和 9 月的 15—20 日利用五点取样法对上述 45 个样点的植被状况进行调查。在每个样点选择 1 个 20 m×40 m 的区域(通常包含在扫网样方当中), 在区域的中心及四角各取 1 个 1 m×1 m 的样方, 对样方当中草本植物的物种和盖度进行调查; 若样地中有灌木, 则在区域中心及四角选择 5 m×5 m 的样方进行灌木物种、数量、盖度及花朵数的调查; 若样地中有乔木, 则统计区域中所有乔木的数量及物种。线性要素样点选择 5 m×40 m 的条状区域, 并在区域的两端选择草本或灌木的样方进行调查; 若线性要素样地中有乔木, 则统计条状区域中所有的乔木数量及物种。取某一样地所有样方中的某一种植物的盖度最大值作为这种植物在这块样地中的盖度; 取某一生境所有样地的该植物盖度的平均值作为这种植物在这类生境中的盖度。

②植物开花季节与提供花蜜/花粉资源的能力调查: 通过查询蜜粉源植物的相关文献及书籍[23-26], 将植物的开花季节及提供花粉和花蜜能力分为 1~4 共 4 个等级。花粉和花蜜作为食物资源来说对传粉昆虫同等重要, 因此植物物种 i 为传粉昆虫提供植物资源的能力f_i为:

$$f_i = \frac{p_i + n_i}{2} \quad (3)$$

式中: p_i为植物物种 i 提供花粉资源的能力, n_i 为植物物种 i 提供花蜜资源的能力。

③植物资源可用性计算: 综合上述指标, 则土地利用类型 j 在季节 k 为传粉昆虫提供植物资源的能力F_j为:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i \times c_i}{5} \quad (4)$$

式中: f_i为在 k 季节开花的植物物种 i 为传粉昆虫提供植物资源的能力, c_i为在 k 季节开花的植物物种 i 在生境 j 中的盖度, 系数 1/5 是为了保证F_j的值在 0~1 之间。果园的植物资源可用性取 3 类果园的平均值。

3)筑巢适宜性数据

研究从地面、枯木或在植物茎秆、废弃的洞穴或巢穴 3 个方面来评价生境对野生蜂的筑巢适宜性。地面筑巢适宜性通过实际测量的土壤紧实度(soil compactness)来评价,在 5 月 15 日至 20 日对上述 45 个样点进行土壤紧实度测量, 每个样点选择 3 个点, 使用 IB 型号的手动土壤表面紧实度测量仪来测量该点土壤深度 10 cm 处的土壤紧实度, 通常在样地的外侧样带的不同端点及中间样带的中点, 及线性单元样带的两端选择测量点。其它筑巢适宜性参考了 Lonsdorf 等[27]的研究中的数据。

4)模型验证

在传粉者相对多度分布图中, 截出各样地的样方(50 m×30 m, 绿色线性单元为 50 m×10 m), 计算样方内栅格的相对多度平均值, 并与实际测得的多度值进行 Pearson 相关性分析, 对模型得到的相对多度值进行验证。研究虽然对不同生境的野生蜂多度进行了调查, 但是由于 InVEST 模型的结果能够涵盖更多的土地利用信息, 且实际测量值与 InVEST 模型的计算值显著线性相关(Pearson correlation=0.570, P=0.000 04), 因此研究仍采用模型的结果作为传粉服务供给的评估结果。

1.2.3 研究区传粉服务需求评估

1)作物种植面积

作物种植面积指标从昌平区统计局 2016 年的统计数据中获得, 分为果树和蔬菜两部分。数据显示, 昌平区的蔬菜种植方式中, 普通温室(大棚)所占面积最大, 因此, 蔬菜的种植面积数据选择普通温室中 4—10 月蔬菜种植面积的平均值。

2)作物对传粉的依赖程度

本研究中主要采用刘朋飞等[28]的研究作为生物传粉依赖度数据(表 1), 其研究结果计算了包含提升产量和改善作物质量两方面作用的作物对传粉服务的依赖程度值:

$$\alpha_k = Y_k + Q_k \quad (5)$$

式中: α_k为作物 k 对传粉的依赖度, Y_k为蜜蜂传粉带来的产量增加的价值, Q_k为蜜蜂传粉改善作物质量所带来的附加价值。

上述研究中缺少数据, 通过查阅其他文献[29-30], 以相同的公式进行计算。

表 1　昌平区主要蔬菜与水果对传粉的依赖度

Table 1　Dependency levels of main vegetables and fruits in Changping District

作物 Crop	传粉依赖度 Pollination dependency ratio (%)	作物名称 Crop	传粉依赖度 Pollination dependency ratio (%)
苹果 *Malus pumila*	76	黄瓜 *Cucumis sativus*	35
梨 *Pyrus bretschneideri*	98	冬瓜 *Benincasa hispida*	71
桃 *Amygdalus persica*	49	南瓜 *Cucurbita moschata*	67
樱桃 *Cerasus pseudocerasus*	49	西葫芦 *Cucurbita pepo*	92
李子 *Prunus salicina*	30	番茄 *Lycopersicon esculentum*	66
葡萄 *Vitis vinifera*	5	辣椒 *Capsicum annuum*	70
枣 *Ziziphus jujuba*	46	茄子 *Solanum melongena*	40
杏 *Armeniaca vulgaris*	42	菜豆 *Phaseolus vulgaris*	10
柿子 *Diospyros kaki*	26	豇豆 *Vigna unguiculata*	10

3)传粉服务需求评估

传粉服务的需求计算以行政镇为单位, 分果树与蔬菜两类进行, 分别赋值给各镇中的果园和大棚两类土地利用类型。则 *i* 镇中作物 *k* 对传粉服务的需求D_{ik}的计算公式为:

$$D_{ik}=\frac{\sum_{k=1} S_k\times\alpha_k}{S_i} \qquad (6)$$

式中: S_k为作物 *k* 在 *i* 镇的种植面积, S_i为i镇的总面积, α_k为作物 *k* 对传粉服务的依赖程度。

1.2.4　研究区传粉服务供需匹配

由于供需平衡是基于对传粉服务有需求的区域讨论的, 因此, 将传粉服务供给分布图中的果园与大棚区域进行提取, 得到农业区域的传粉服务供给图, 再使用自然间断点法对传粉服务供给分为高供给、中供给、低供给 3 个等级; 使用同样的方法将传粉服务的需求分布图分为与供给相对应的高需求、中需求、低需求 3 个等级; 将分为 3 个等级的供给与需求分布图进行叠加, 进行研究区的传粉服务供需匹配。

1.2.5　研究区传粉服务管理分区分析

由于野生蜂的飞行距离大多在 1.5 km 以内, 以此为依据, 研究将需求区域(果园与大棚)周围 1.5 km 缓冲区的范围内设为需要进行传粉服务管理的区域, 并根据供需状况划定不同的传粉服务管理区。分区后, 使用 Fragstats 16.0 计算各管理区的自然/半自然生境比例、耕作区域比例及生境连接度, 以对各分区提出相应的管理建议。

2　结果与分析

2.1　不同季节野生蜂取样情况

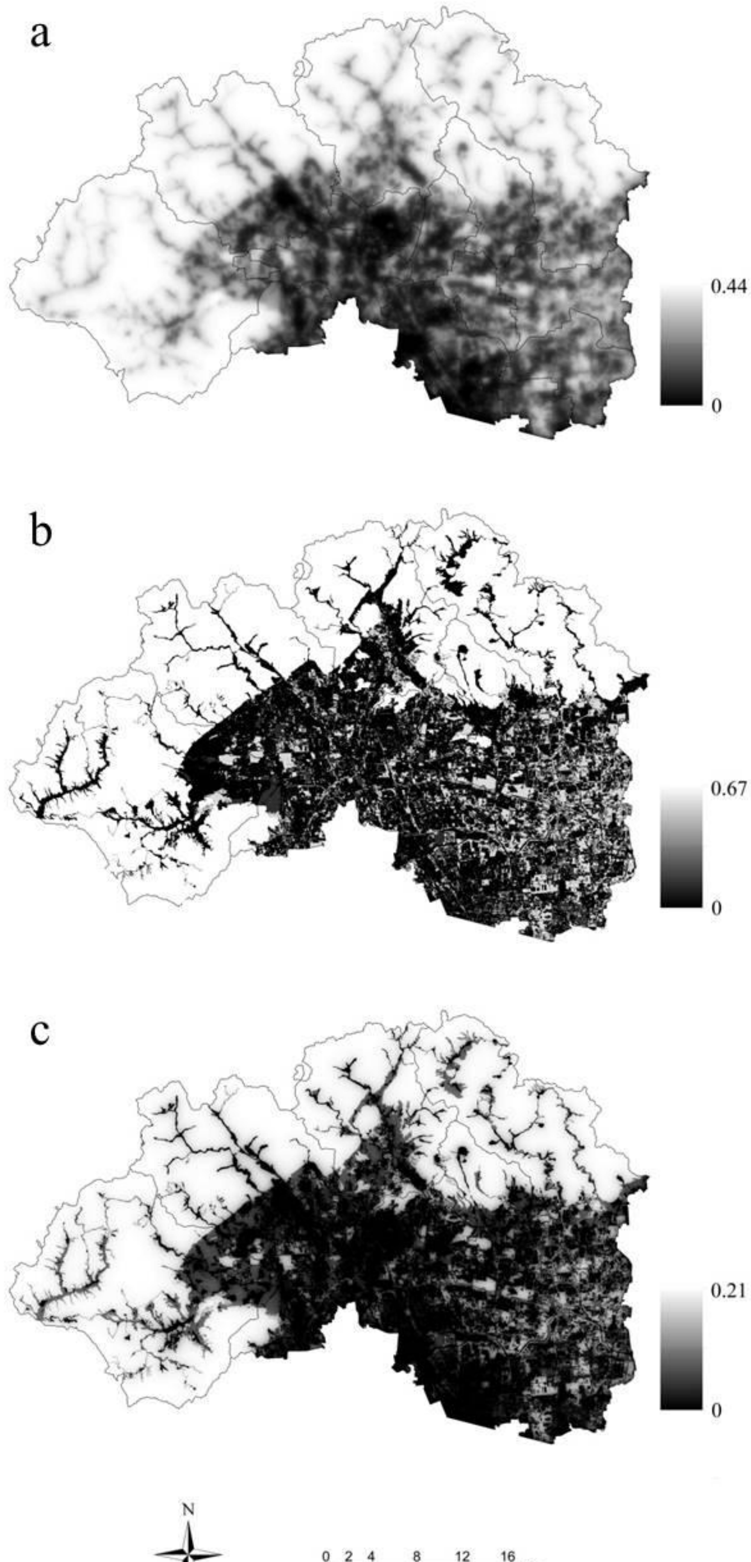
在整个取样季共捕获了 646 头野生蜂, 分别属于 82 个种, 其中, 优势物种为铜色隧蜂(*Halictus aerarius*), 数量为 75 头, 所占比例为 11.7%。不同季节取样结果如下: 春季 177 头, 共 43 个种, 优势物种为黄芦蜂(*Ceratina flavipes*), 数量为 18 头, 所占比例为 10.2%; 夏季 316 头, 共 43 个种, 优势物种为黄胸彩带蜂(*Nomia thoracica*), 数量为 63 头, 所占比例为 19.9%; 秋季 153 头, 共 41 个种, 优势物种为领分舌蜂(*Collletes collaris*), 数量为 26 头, 所占比例为 17.0%。

2.2　研究区传粉服务供给评估结果

InVEST 输出的筑巢适宜性分布图(图 4a)显示, 山区自然林生境及东部人工林生境中均有较高的筑巢适宜性, 荒草地及果园生境的筑巢适宜性为中等, 非生境区域几乎没有筑巢适宜性; 绿色线性单元中, 农田边界具有极高的筑巢适宜性, 道路边界的筑巢适宜性为中等。植物资源可用性分布图(图 4b)显示, 自然林、人工林、农田边界生境及其周围栅格的植物资源可用性较高, 荒草地、果园、道路边界及其周围栅格的植物资源可用性为中等, 非生境区域靠近自然/半自然生境的边缘部分有较低的植物资源可用性, 中心区域几乎没有植物资源可用性。

野生蜂相对多度图(图 4c)显示, 山区的自然林生境中有较高的野生蜂相对多度, 东部的人工林中野生蜂相对多度也较高, 荒草地生境及山区附近的果园生境中的野生蜂相对多度为中等, 在非生境区域, 几乎没有野生

蜂的出现。在绿色线性单元中，农田边界具有相当高的野生蜂相对多度，仅次于自然林生境，道路边界的相对多度为中等。



a 植物资源可用性; b 筑巢适宜性; c 传粉者相对多度。
a: flora resource; b: nesting suitability; c: pollinator abundance index.

图 4　InVEST 模型计算出的昌平区传粉服务供给空间分布

Fig. 4　Distribution of pollination service indexes evaluated by InVEST model

2.3　研究区传粉服务需求评估结果

将果树与蔬菜传粉服务需求的值分别赋到各行政镇当中, 并与遥感分类结果中的果园与大棚进行叠加, 获取各行政镇的果园与大棚传粉需求的分布(图 5)。其中, 低需求区域集中在昌平区东南部平原地区, 包括北七家镇、东小口镇、沙河镇东部、百善镇东部、马池口镇东部和北部、崔村镇南部、兴寿镇南部和小汤山镇的部分地区; 中需求区域位于昌平区西部和东北部的山区及平原的少部分地区, 包括流村镇、南口镇、兴寿镇北部、马池口镇东部、百善镇中部及小汤山镇大部分地区; 高需求区域集中在昌平区中部靠近山区的平原地区, 包括十三陵镇、南邵镇北部和崔村镇北部。

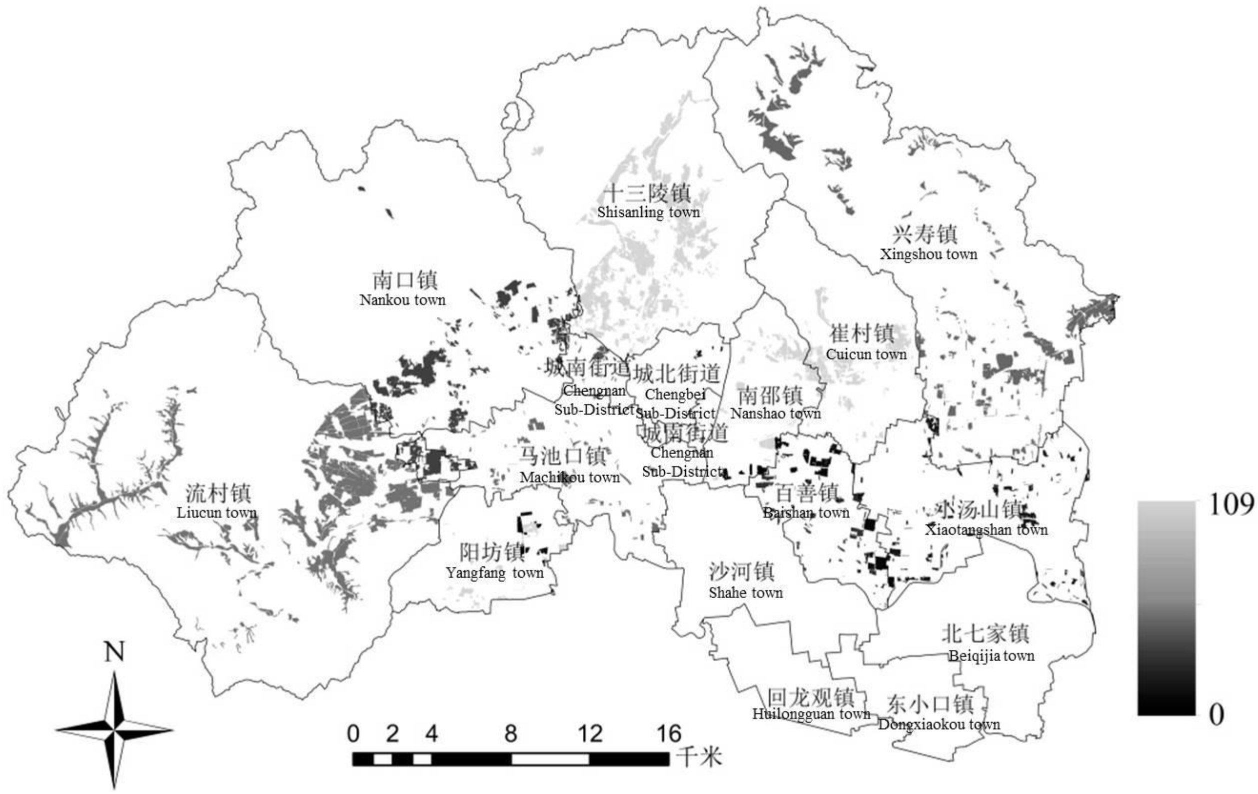


图 5　昌平区传粉服务需求分布图

Fig. 5　Distribution of demand of pollination service in Changping Dsitrict.

2.4　研究区传粉服务供需匹配分析

2.4.1　供需匹配结果

将使用自然间断点法分为 3 个等级的供给与需求分布图进行叠加后, 得到传粉服务供需匹配图(图 6)。各供需关系的面积及所占比例见表 2。

表 2　昌平区不同供需关系区域面积及比例

Table 2　Area and proportion of different supply-demand relationship areas in Changing District

供需关系类型 Supply-demand relationship	面积 Area (km^2)	所占比例 Proportion (%)
低供给-高需求 Low supply-high demand	0.12	0.11
低供给-中需求 Low supply-medium demand	0.23	0.21
低供给-低需求 Low supply-low demand	14.24	12.96
中供给-高需求	14.90	13.56

Medium supply-high demand		
中供给-中需求 Medium supply-medium demand	30.91	28.13
中供给-低需求 Medium supply-low demand	3.13	2.85
高供给-高需求 High supply-high demand	11.91	10.84
高供给-中需求 High supply-medium demand	33.73	30.70
高供给-低需求 High supply-low demand	0.69	0.63

其中, 供给等级高于需求等级的区域面积为 37.55 km^2, 所占比例为 34.2%; 供给与需求等级一致的区域面积为 51.9 km^2, 所占比例为 47.3%; 供给等级低于需求等级的区域面积为 30.5 km^2, 所占比例为 27.8%。

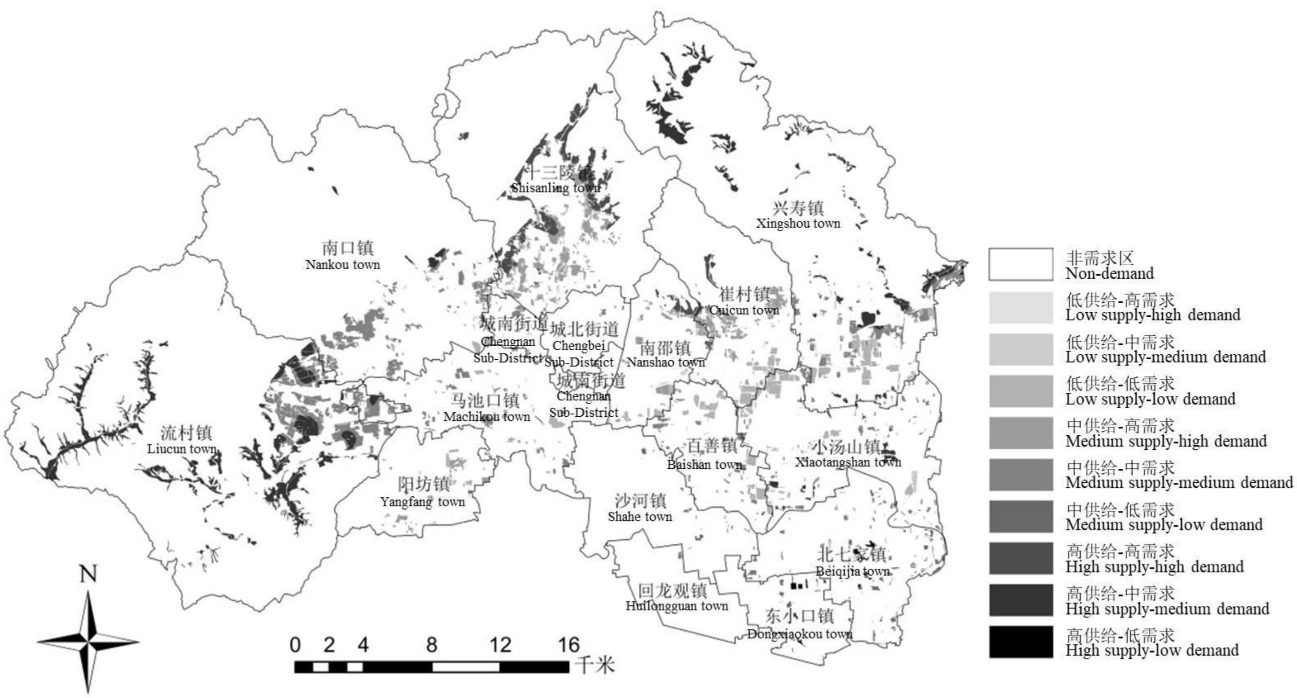


图 6　昌平区传粉服务供需匹配图

Fig. 6　Distribution of different supply-demand relationship areas in Changping District.

2.4.2　昌平区传粉服务供需匹配及传粉管理分区分析

在山区面积比例比较高的地区(流村、兴寿、南口), 传粉服务供给等级均较高, 基本可以达到供需相等, 或高/中供给-低需求的状态; 在距离山区较近, 同时有较多果园的地区(十三陵、崔村、南邵), 虽然传粉服务供给较高, 但需求也相应较高; 在东南部有较多人工林而没有太多果树或蔬菜种植的地区(北七家、东小口、沙河、小汤山南部), 传粉服务较高但需求相对较低, 有的地区甚至是高供给-低需求; 在平原中城镇化较高的一些地区(城南街道、城北街道、百善、小汤山北部、马池口), 虽然传粉服务供给不高, 但由于仅有少量蔬菜种植, 传粉需求也较低; 在阳坊镇东部, 有部分地区种植的蔬菜果树较多, 但传粉服务供给程度低, 因此处于低供给-高需求状态。根据传粉服务供给和需求的状况, 可以将研究区分为如下几个管理分区(图 7)。

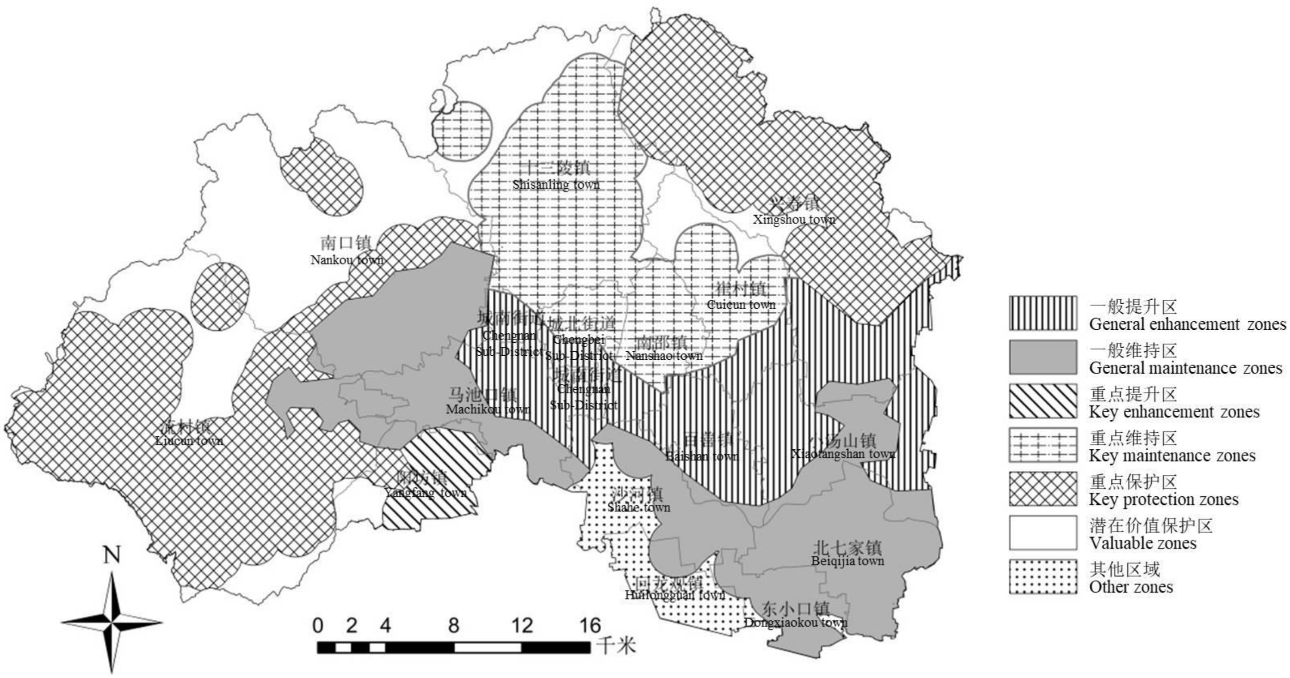


图 7　昌平区传粉服务管理分区

Fig. 7 Pollination management zoning mape of Changping District.

1)一般提升区为低供给-低需求和低供给-中需求集中的区域, 主要包括兴寿镇南部、崔村镇南部、百善镇、小汤山镇东部和西部、马池口镇北部、城北街道南部和城南街道。

2)一般维持区为中供给-中需求和中供给-低需求集中的区域, 主要包括南口镇东南部、马池口镇西南部、流村镇东部、沙河镇西北部、小汤山镇中部、北七家镇和东小口镇。

3)重点提升区为低供给-高需求和低供给-中需求集中的区域, 主要为阳坊镇。

4)重点维持区为高供给-高需求和中供给-高需求集中的区域, 主要包括十三陵镇南部的大部分区域、城北街道北部、南邵镇北部和崔村镇北部。

5)重点保护区为高供给-中需求和高供给-低需求集中的地区, 主要包括流村镇的大部分区域、南口镇的北部和中部、兴寿镇的北部。

6)潜在价值保护区为未划入昌平区传粉服务管理区域, 但具有较高的自然林生境比例, 具有潜在的传粉服务供给价值的区域, 包括流村镇南部和北部、南口镇北部、十三陵镇北部、崔村镇北部和兴寿镇中部。

7)其他区域为对传粉服务几乎无需求, 亦无较高供给的区域, 包括沙河镇西部和回龙观镇。

对各区的景观特征分析(表3)显示, 一般提升区和一般维持区的自然/半自然生境比例相近, 但一般提升区的耕作区域比例较高, 生境连接度也较高; 重点提升区虽然耕作区域比例低, 但自然/半自然生境比例明显较低, 生境连接度较高, 可能是由于区域内有较多边界生境; 重点维持区自然/半自然生境比例较高, 同时耕作区域比例高, 生境连接度中等; 重点保护区的自然/半自然生境比例高, 耕作区域比例较低, 生境连接度高。

表 3　昌平区传粉服务管理区景观指数

Table 3 Landscape indexes of different pollination management areas in Changping District

管理区 Management area	自然/半自然生境比例 Ratio of natural/semi-natural habitat (%)	耕作区域比例 Ratio of farming area (%)	生境连接度 Habitat connectivity
一般提升区 General enhancement zone	41.29	12.44	0.02
一般维持区 General maintenance zone	43.27	9.68	0.02
重点提升区 Key enhancement zone	28.07	7.38	0.15
重点维持区	71.18	13.28	0.04

Key maintenance zone			
重点保护区 Key protection zone	92.80	9.05	0.20

3 结论与讨论

研究结果显示, 自然林是最适宜的野生蜂生境, 其次是人工林与荒草地, 同时边界生境(农田边界与道路边界)的作用也是不可忽视的; 果园作为一类重要的野生蜂生境, 同时也是对传粉服务有需求的农业用地, 大棚对野生蜂来说并非重要的生境, 但对传粉服务有较高需求。传粉服务供需评估的结果显示, 供给等级高于需求等级的区域占34.17%, 大部分分布于山区, 具有较高的传粉服务供给和较低的传粉服务需求, 是有较高价值的保护区; 供给等级低于需求等级的区域占27.76%, 多分布于靠近山区的平原地区, 虽然具有较高的传粉服务供给, 但也具有最高的需求; 供给等级低于需求等级的区域占47.27%, 远离山区的平原地区由于具有较多半自然生境, 传粉服务的供需基本是匹配的。

一般来说, 提高区域传粉服务的主要措施有: 1)在局部尺度上, 减少农业集约化程度, 尽量少用农药和化肥[31-32], 推广环境友好的有机种植模式[33-34]; 采用间套作、轮作等方式种植一些虫媒作物[35]; 在需要传粉的农田周围放置巢管、巢箱等材料, 吸引野生蜂筑巢[36]。2)在景观尺度上, 增加农业景观中的自然/半自然生境比例[9,37], 保护原有的自然生境、利用休耕地提供补充生境、利用农田边界等零散地块创建小型生境、改善景观的空间配置等[38]。结合研究区的情况, 建议采用如下措施: 1)对于高供给-中/低需求(重点保护区)的区域, 建议发展低管理强度的有机农业, 保护区域内的生境; 2)对于中/低供给-高需求的区域(重点提升区、一般提升区), 建议放置蜂箱、管巢等, 使用养殖蜜蜂提升传粉服务, 同时在景观尺度上增加自然/半自然生境比例, 建立生态廊道以增加生境之间的连通度; 3)对于供需等级较为一致的区域(重点维持区、一般维持区), 建议降低农业区域的管理强度, 同时增加生境间的连接度, 以实现传粉服务的可持续供给。

研究从供给和需求两方面对传粉服务的区域分布进行了更加全面的评估, 提出了更加科学的管理意见; 使用了较多研究区实际调查所获得的数据进行指标计算, 而不是以专家意见或文献数据作为数据来源, 提高了评估的准确性[11]。但是仍需在如下方面作进一步完善: 1)数据的完整性和可靠性有待提升。本研究中植物提供花粉或花蜜资源的多寡是以养蜂业, 即以意大利蜜蜂为代表的养殖蜜蜂种群为标准来衡量的, 因此, 这个标准作为野生传粉昆虫食物资源的衡量标准是否准确, 有待进一步的验证; 2)蜜蜂飞行距离的计算使用了Gathmann等[19]研究中的公式, 即飞行距离与其体长关系的公式, 但Greenleaf等[39]提出, 使用翅间距作为体型指标来计算蜜蜂的飞行距离可能是更为准确的, 但因为翅间距数据难以获得, 最终仍然使用了Gathmann的公式; 3)由于无法准确地在遥感影像中解译出各种作物的分布情况, 文中只将以镇为单位计算的需求值赋给果园和大棚土地利用类型(即果树和蔬菜两种作物), 其他如观赏花卉、油料作物等未进行计算, 需要传粉的非作物植物也未能考虑在内, 这些需要将来在进一步改进分类精度后加以补充和完善。如果有更加详细的土地利用图和作物种植状况, 所得到的评估结果可能更为精准; 4)本研究划定的供需等级仅是一个定性的划分。在供需关系评估中所用到的描述都是基于各自的等级进行比较的, 是否够真正地反映区域的传粉服务供需匹配状况仍旧有待讨论。除了等级匹配[10]以外, 还有研究使用广义相加模型(GAM)来分析生态系统服务的供给与需求之间的非线性关系[40], 但依然是一种定性的分析方法。更加定量的分析应当在了解更多野生蜂和作物的生物学特性的基础上进行。因此, 未来需要加强对野生蜂的生物学及生态学特征的研究, 获取野生蜂的觅食偏好、筑巢偏好、生物性状等数据, 进行更加准确的生境适宜性评估, 提高对传粉服务评估的准确性; 同时也需要更多来源和更高精度的土地利用信息, 有利于对区域传粉服务的供需分布进行更加准确的制图。

参考文献 References

[1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis[M]. Washington: Island Press, 2005

[2] POTTS S G, ROBERTS S P M, DEAN R, et al. Declines of managed honey bees and beekeepers in Europe[J]. Journal of Apicultural Research, 2010, 49(1): 15–22

[3] KLEIN A M, VAISSIÈRE B E, CANE J H, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 274(1608): 303–313

[4] AIZEN M A, GARIBALDI L A, CUNNINGHAM S A, et al. Long-term global trends in crop yield and production reveal no current pollination shortage but increasing pollinator dependency[J]. Current Biology, 2008, 18(20): 1572–1575
[5] BOMMARCO R, KLEIJN D, POTTS S G. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2013, 28(4): 230–238
[6] 马凤娇, 刘金铜, ENEJI A E. 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 5963–5972
MA F J, LIU J T, ENEJI A E. A review of ecosystem services and research perspectives[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 5963–5972
[7] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 702–710
ZHENG H, LI Y F, OUYANG Z Y, et al. Progress and perspectives of ecosystem services management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 702–710
[8] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441–446
FU B J, ZHANG L W. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441–446
[9] KREMEN C, WILLIAMS N M, AIZEN M A, et al. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: A conceptual framework for the effects of land-use change[J]. Ecology Letters, 2007, 10(4): 299–314
[10] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17–29
[11] GALBRAITH S M, VIERLING L A, BOSQUE-PÉREZ N A. Remote sensing and ecosystem services: Current status and future opportunities for the study of bees and pollination-related services[J]. Current Forestry Reports, 2015, 1(4): 261–274
[12] KAREIVA P, TALLIS H, RICKETTS T H, et al. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011: 1264–1265
[13] 李捷, 朱朝东, 王凤鹤, 等. 野生蜜蜂及其传粉作用的研究现状[J]. 生物多样性, 2007, 15(6): 687–692
LI J, ZHU C D, WANG F H, et al. Current research on the status of wild bees and their pollination roles[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(6): 687–692
[14] BREEZE T D, VAISSIÈRE B E, BOMMARCO R, et al. Agricultural policies exacerbate honeybee pollination service supply-demand mismatches across Europe[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e82996
[15] CONNELLY H, POVEDA K, LOEB G. Landscape simplification decreases wild bee pollination services to strawberry[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 211: 51–56
[16] WESTPHAL C, BOMMARCO R, CARRÉ G, et al. Measuring bee diversity in different European habitats and biogeographical regions[J]. Ecological Monographs, 2008, 78(4): 653–671
[17] 吴燕如. 中国动物志 昆虫纲 第二十卷 膜翅目 准蜂科 蜜蜂科[M]. 北京: 科学出版社, 2000
WU Y R. Fauna Sinica Insecta Vol. 20 Hymenoptera Melittidae Apidae[M]. Beijing: Science Press, 2000
[18] 吴燕如. 中国动物志 昆虫纲 第四十四卷 膜翅目 切叶蜂科[M]. 北京: 科学出版社, 2006
WU Y R. Fauna Sinica Insecta Vol. 44 Hymenoptera Megachilidae[M]. Beijing: Science Press, 2006
[19] GATHMANN A, TSCHARNTKE T. Foraging ranges of solitary bees[J]. Journal of Animal Ecology, 2002, 71(5): 757–764
[20] 丁亮, 黄敦元, 张彦周, 等. 油茶地蜂营巢生物学观察[J]. 昆虫学报, 2007, 50(10): 1077–1082
DING L, HUANG D Y, ZHANG Y Z, et al. Observation on the nesting biology of *Andrena camellia* Wu (Hymenoptera: Andrenidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2007, 50(10): 1077–1082
[21] 蒙艳华, 徐环李. 双斑切叶蜂的筑巢习性[J]. 昆虫学报, 2008, 51(11): 1170–1176
MENG Y H, XU H L. Nesting behavior of *Megachile leachella* (Hymenoptera: Megachilidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2008, 51(11): 1170–1176
[22] 赵延会, 丁亮, 袁峰, 等. 大分舌蜂营巢生物学[J]. 昆虫学报, 2010, 53(11): 1287–1294
ZHAO Y H, DING L, YUAN F, et al. Nesting biology of *Colletes gigas* Cockerell (Hymenoptera: Colletidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2010, 53(11): 1287–1294
[23] 林盛秋. 蜜源植物[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989
LIN S Q. Nectar Plants[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989
[24] 徐万林. 中国蜜源植物[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1983
XU W L. Chinese Nectar Plants[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1983

[25] 柯贤港. 蜜粉源植物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995
KE X G. Nectar and Pollen Plants[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1995
[26] 马德风, 梁诗魁. 中国蜜粉源植物及其利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993
MA D F, LIANG S K. Chinese Nectar and Pollen Plants, and Their Utilization[M]. Beijing: China Agriculture Publishing House, 1993
[27] LONSDORF E, KREMEN C, RICKETTS T, et al. Modelling pollination services across agricultural landscapes[J]. Annals of Botany, 2009, 103(9): 1589–1600
[28] 刘朋飞, 吴杰, 李海燕, 等. 中国农业蜜蜂授粉的经济价值评估[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 5117–5123
LIU P F, WU J, LI H Y, et al. Economic values of bee pollination to China’s agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(24): 5117–5123
[29] 申晋山, 武文卿, 马卫华, 等. 蜜蜂授粉与喷施赤霉素对枣树坐果及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(12): 1308–1310
SHEN J S, WU W Q, MA W H, et al. Effects of bee pollination and gibberellin on jujube fruit setting and quality[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 1308–1310
[30] 国占宝, 李乃光, 孙永深, 等. 熊蜂为温室冬瓜授粉的效果研究[J]. 蜜蜂杂志, 2003, (6): 3–4
GUO Z B, LI N G, SUN Y S, et al. A study on the pollination of bumblebees to greenhouse white gourd[J]. Journal of Bee, 2003, (6): 3–4
[31] STANLEY D A, GARRATT M P D, WICKENS J B, et al. Neonicotinoid pesticide exposure impairs crop pollination services provided by bumblebees[J]. Nature, 2011, 528(7583): 548–550
[32] OTIENO M, WOODCOCK B A, WILBY A, et al. Local management and landscape drivers of pollination and biological control services in a Kenyan agro-ecosystem[J]. Biological Conservation, 2011, 144(10): 2424–2431
[33] POWER E F, STOUT J C. Organic dairy farming: Impacts on insect-flower interaction networks and pollination[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(3): 561–569
[34] ANDERSSON G K, RUNDLÖF M, SMITH H G. Organic farming improves pollination success in strawberries[J]. PLoS One, 2012, 7(2): e31599
[35] MARTINS K T, GONZALEZ A, LECHOWICZ M J. Pollination services are mediated by bee functional diversity and landscape context[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200: 12–20
[36] 徐环李, 杨俊伟, 孙洁茹. 我国野生传粉蜂的研究现状与保护策略[J]. 植物保护学报, 2009, 36(4): 371–376
XU H L, YANG J W, SUN J R. Current status on the study of wild bee-pollinators and conservation strategies in China[J]. Journal of Plant Protection, 2009, 36(4): 371–376
[37] BENNETT A B, ISAACS R. Landscape composition influences pollinators and pollination services in perennial biofuel plantings[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 193: 1–8
[38] 戴漂漂, 张旭珠, 刘云慧. 传粉动物多样性的保护与农业景观传粉服务的提升[J]. 生物多样性, 2015, 23(3): 408–418
DAI P P, ZHANG X Z, LIU Y H. Conserving pollinator diversity and improving pollination services in agricultural landscapes[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(3): 408–418
[39] GREENLEAF S S, WILLIAMS N M, WINFREE R, et al. Bee foraging ranges and their relationship to body size[J]. Oecologia, 2007, 153(3): 589–596
[40] SCHULP C J E, LAUTENBACH S, VERBURG P H. Quantifying and mapping ecosystem services: Demand and supply of pollination in the European Union[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 131–141